

MINISTÈRE DE LA FRANCE D'OUTRE-MER

Office de la Recherche Scientifique
et Technique d'Outre-Mer

INSTITUT DE RECHERCHES SCIENTIFIQUES
DE MADAGASCAR

Étude hydrologique
de l'IKOPA et de la BETSIBOKA

NOTE HYDROLOGIQUE

AVRIL 1958

MINISTERE de la FRANCE d'OUTRE-MER

OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE
et TECHNIQUE OUTRE-MER

INSTITUT de RECHERCHES SCIENTIFIQUES
de MADAGASCAR

ETUDE HYDROLOGIQUE
de l'IKOPA et de la BETSIBOKA

NOTE HYDROLOGIQUE

AVRIL 1958

Cette étude a pour but de tirer des observations pluviométriques et hydrologiques existantes au 1er Juillet 1957, le maximum de données utilisables pour les différents avant-projets envisagés sur l'IKOPA et la BETSIBOKA : elle n'a donc aucun caractère définitif et devra être modifiée lorsque la campagne de mesures en cours sera terminée.

Les débits caractéristiques donnés ci-après se rapportent à la station d'ANTSATRANA pour l'IKOPA et à celle d'AMBODIROKA pour la BETSIBOKA. Les débits moyens mensuels et annuels concernant les bassins intermédiaires pourront être calculés, en première approximation, en adoptant les mêmes débits spécifiques. Bien entendu, cette simplification ne pourrait être admise pour les bassins supérieurs, surtout pour le bassin supérieur de l'IKOPA.

Carte de situation



I - APERÇU GEOGRAPHIQUE et CLIMATIQUE : Comparaison des deux bassins -

L'IKOPA et la BETSIBOKA descendent des Hauts-Plateaux sur le versant Ouest de MADAGASCAR (carte 1). Un peu au Nord de MAEVATANANA, les deux rivières confluent dans une zone deltaïque marécageuse.

Le bassin de l'IKOPA, limité à la station d'ANTSATRANA, est compris entre 17°25' et 19°30' de latitude Sud; celui de la BETSIBOKA à AMBODIROKA s'étend de 16°55' à 18°50' S. Le relief des deux bassins est très comparable, bien que l'altitude moyenne de la BETSIBOKA soit inférieure à celle de l'IKOPA. La couverture végétale est la même : steppes sur les plateaux et les pentes, végétation arborée plus fournie dans les fonds de vallée. Les touffes de cette végétation herbacée recouvrent en général des formations latéritiques provenant de la décomposition du socle précambrien (schistes, gneiss et granites). Seule la cuvette de TANANARIVE recèle un dépôt alluvionnaire permettant un développement important des cultures vivrières (rizières).

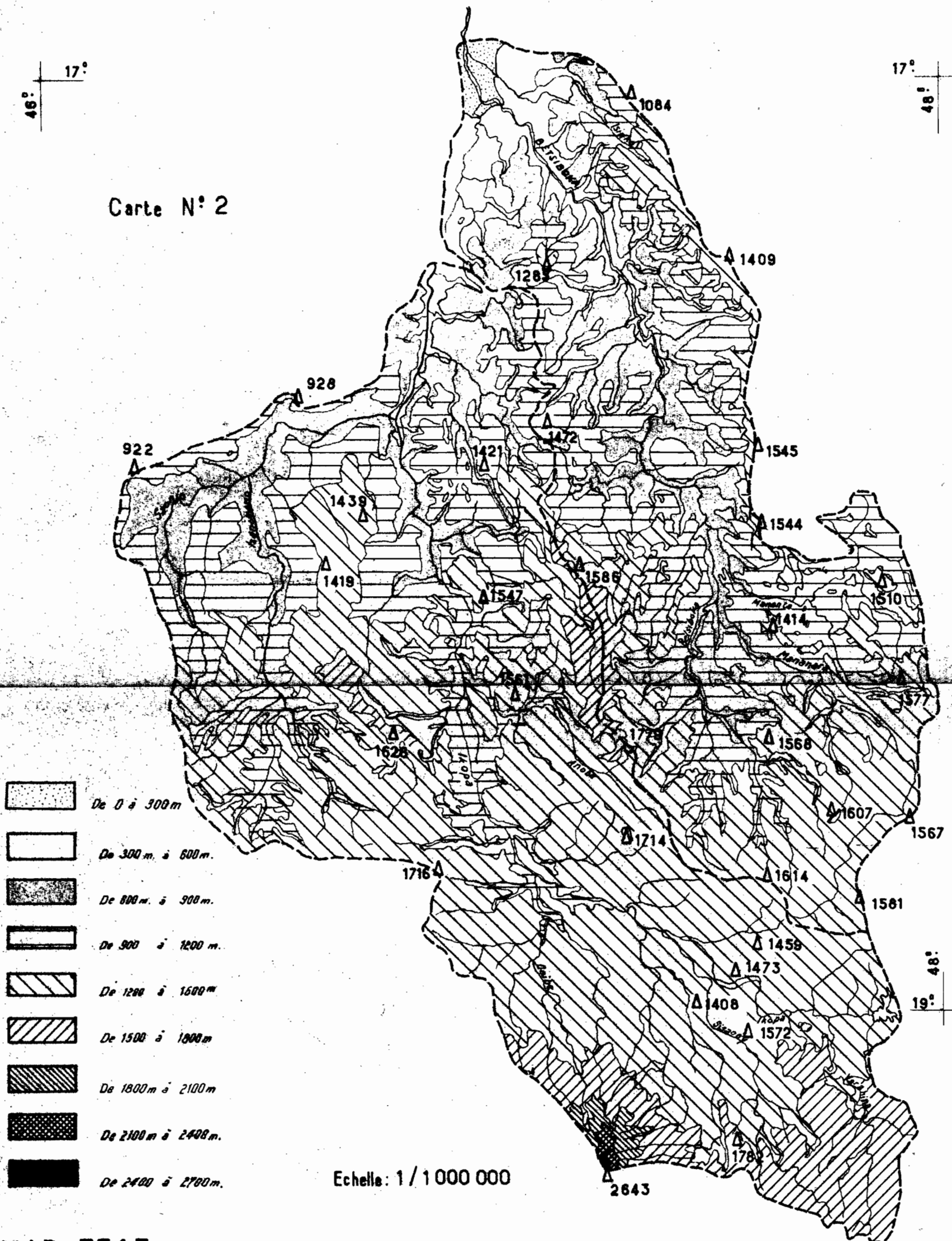
Le relief des bassins et le réseau hydrographique sont représentés sur la carte 2. La carte 3 montre la répartition géologique approximative des terrains. Si l'on considère que tous ces terrains donnent à peu près les mêmes produits de décomposition et que l'altération superficielle est la règle, on voit que l'ensemble est géologiquement très homogène du point de vue hydrologique.

Une partie importante de notre étude hydrologique est basée sur la similitude physique des deux bassins. Nous avons vu que celle-ci est justifiée en ce qui concerne la géologie et la végétation, il nous reste à étudier l'influence du relief et des conditions climatiques.

BETSIBOKA - IKOPA

Relief et Réseau Hydrographique

Carte N° 2



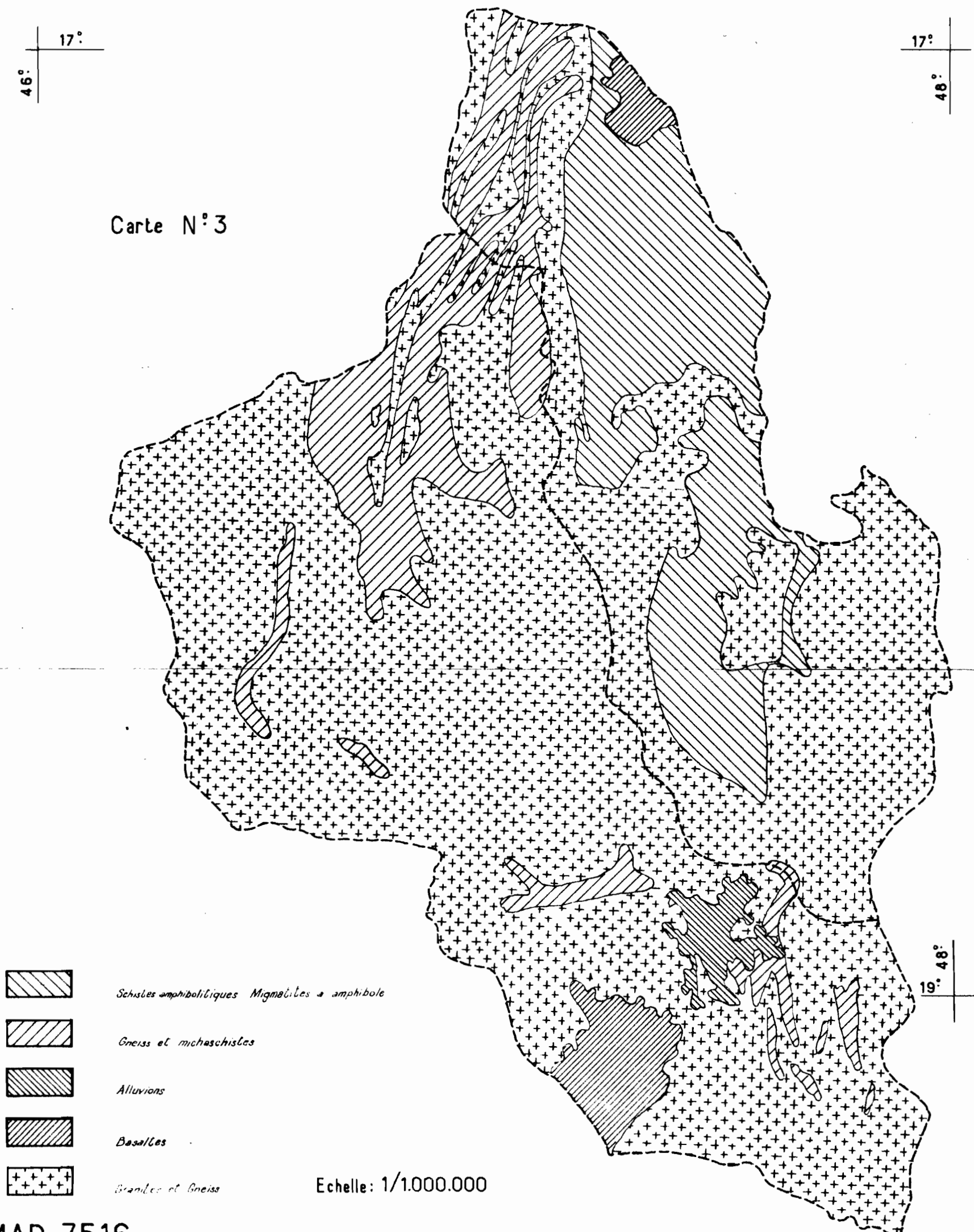
Echelle: 1 / 1 000 000

MAD. 7515

IKOPA - BETSIBOKA

Carte géologique simplifiée

Carte N° 3



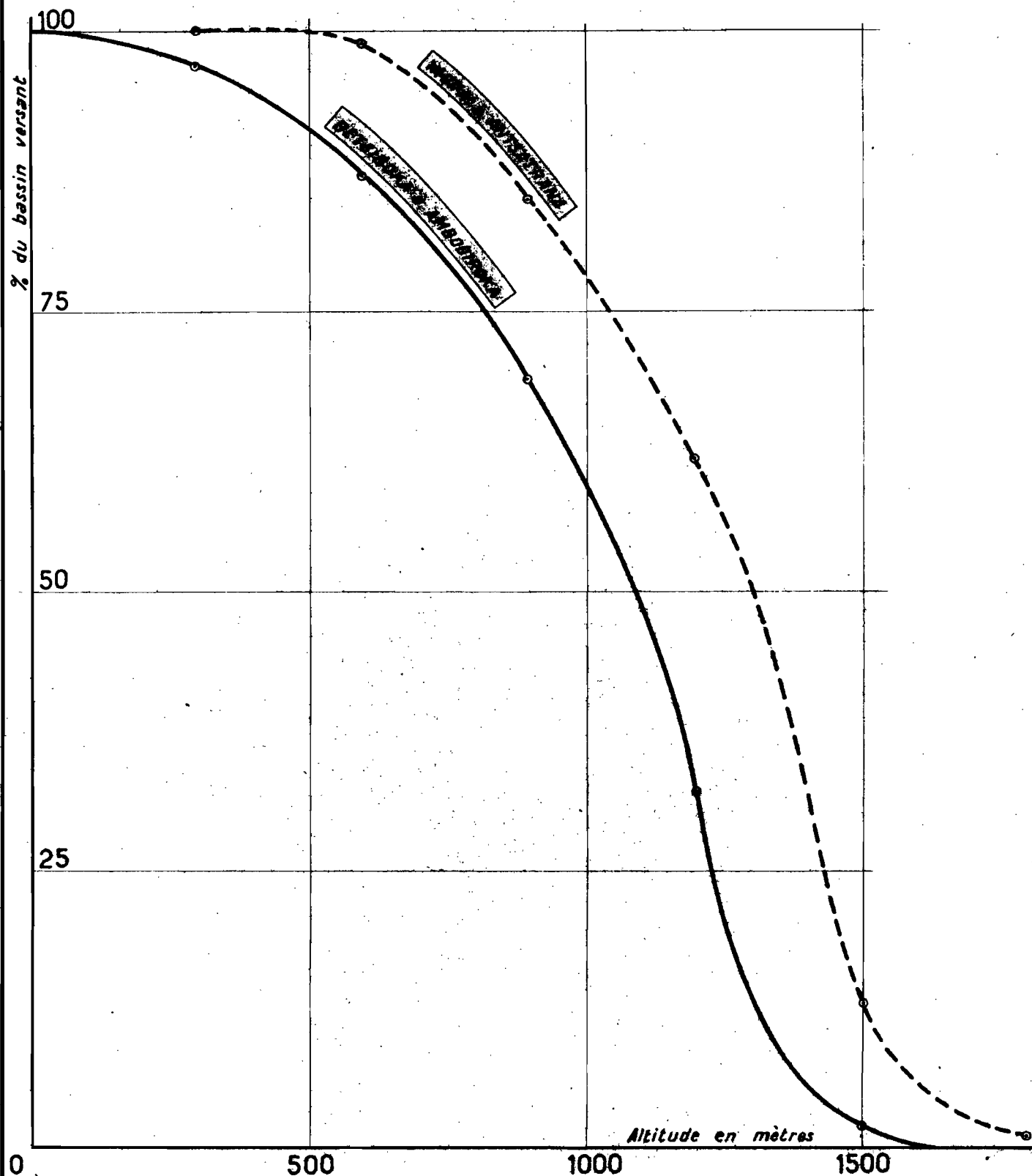
MAD 7516

Le graphique 1 représente les courbes hypsométriques de l'IKOPA et de la BETSIBOKA : les ordonnées donnent les pourcentages de la surface de chaque bassin pour lesquels les altitudes sont supérieures ou égales aux altitudes exprimées par les abscisses correspondantes. On voit dès l'abord que les courbes sont sensiblement parallèles. La forme du bassin, combinée à la répartition hypsométrique joue son rôle dans le "rendement hydrologique", donc sur le pourcentage de pluie qui parviendra à la station considérée sous forme de débit. En effet, plus le cheminement de l'eau sera long, du point d'impact de la précipitation à l'exutoire, plus grande sera la fraction absorbée par l'évapotranspiration. La quantité soustraite au débit de la rivière est fonction non seulement de la longueur à parcourir, mais également de la vitesse avec laquelle cette longueur sera parcourue. Si l'on s'en tient au ruissellement, on peut dire que, grosso modo, la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la pente. D'où une nouvelle notion d'indice de pente dont nous définissons ci-dessous le principe et le mode de calcul.

Nous supposons que l'écoulement sur un bassin donné est approximativement le même que sur un rectangle ayant même superficie, même indice de forme (coefficient de compacité de GRAVELIUS) et même répartition hypsométrique, étant entendu que les distributions de terrains et de végétation sont respectées dans les différentes aires comprises entre les courbes de niveau. Il s'agit donc d'une transformation purement géométrique dans laquelle le contour du bassin devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveau des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire un des petits côtés du rectangle que nous avons appelé "rectangle équivalent".

Supposons obtenu un tel rectangle et les courbes de niveau de cotes : A_0 (exutoire), $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$. Considérons la distance x_i comprise entre les courbes des niveaux A_{i-1} et A_i . La pente moyenne dans cet élément sera $\frac{A_i - A_{i-1}}{x_i}$. Pour tirer de cette expression un élément d'indice relatif à l'influence de la pente sur l'écoulement, nous avons vu qu'on pouvait prendre approximativement sa racine carrée. D'autre part, cet élément d'indice étant relatif à une fraction

COURBES HYPSONÉTRIQUES



MAD. 7518

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE INSPECTION GÉNÉRALE UNION FRANÇAISE & ÉTRANGER

ED:

LE: AVRIL 50

DES: ORYTHA

VISA:

TUBE N°:

A1

$x_1 \ell$ du bassin, on devra le pondérer par le nombre

$\frac{x_1 \ell}{S} = \frac{x_1}{L}$ pour tenir compte de sa zone d'influence. On obtient finalement comme valeur de l'indice de pente du bassin :

$$L_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n x_i \sqrt{\frac{A_i - A_{i-1}}{x_i}}$$

Nous admettons que cet indice caractérise le coefficient d'écoulement de bassins présentant par ailleurs des caractéristiques analogues pour la géologie, la végétation, la température etc.... à condition que leurs superficies soient du même ordre.

CALCUL de l'INDICE de PENTE :

Le coefficient de compacité de GRAVELIUS est défini par son auteur comme le rapport du périmètre P du bassin étudié à celui d'un cercle de même superficie (S). On a donc :

$$K = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Si ℓ et L sont la largeur et la longueur du rectangle équivalent, on a :

$$2(L + \ell) = P = \frac{K\sqrt{S}}{0,28}$$

$$L\ell = S$$

d'où :

$$L = \frac{K\sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \left(1 - \frac{1,12}{K} \right)^2 \right]$$

La valeur de la fonction $A = \frac{K}{1,12} \left[1 + \left(1 - \frac{1,12}{K} \right)^2 \right]$
est donnée par une courbe tracée une fois pour toutes et
 $L = A \sqrt{S} \quad (2)$

CALCUL de I_p pour la BETSIBOKA à AMBODIROKA :

$$\begin{aligned} S &= 11.600 \text{ km}^2 & \sqrt{S} &= 108 \text{ km} \\ P &= 570 \text{ km} \\ \text{d'où } K &= 1,48 & \text{et } \Lambda &= 2,20 \\ L &= \Lambda \sqrt{S} = 238 \text{ km} \end{aligned}$$

L'hypsométrie du bassin est représentée par la répartition suivante, les surfaces étant exprimées en fractions de la surface totale :

40 à 300 m :	0,03
300 à 600 m :	0,10
600 à 900 m :	0,18
900 à 1200 m :	0,37
1200 à 1500 m :	0,30
1500 à 1800 m :	0,02

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{1}{\sqrt{238}} \left[\sqrt{0,03 \times 0,280} + \sqrt{0,10 \times 0,3} + \sqrt{0,18 \times 0,3} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{0,3 \times 0,3} + \sqrt{0,3 \times 0,02} \right] = 0,078 \end{aligned}$$

CALCUL de I_p pour l'IKOPA à ANTSATRANA :

$$S = 18.650 \text{ km}^2$$

$$\sqrt{S} = 137 \text{ km}$$

$$P = 690 \text{ km}$$

$$\text{d'où } K = 1,41$$

$$\text{et } A = 2,03$$

$$L = A\sqrt{S} = 278 \text{ km}$$

Répartition hypsométrique :

300 à 600 m :	0,01
600 à 900 m :	0,14
900 à 1200 m :	0,23
1200 à 1500 m :	0,49
1500 à 1800 m :	0,12
1800 à 2100 m :	0,01

$$I_p = 0,069$$

PLUVIOMETRIE -

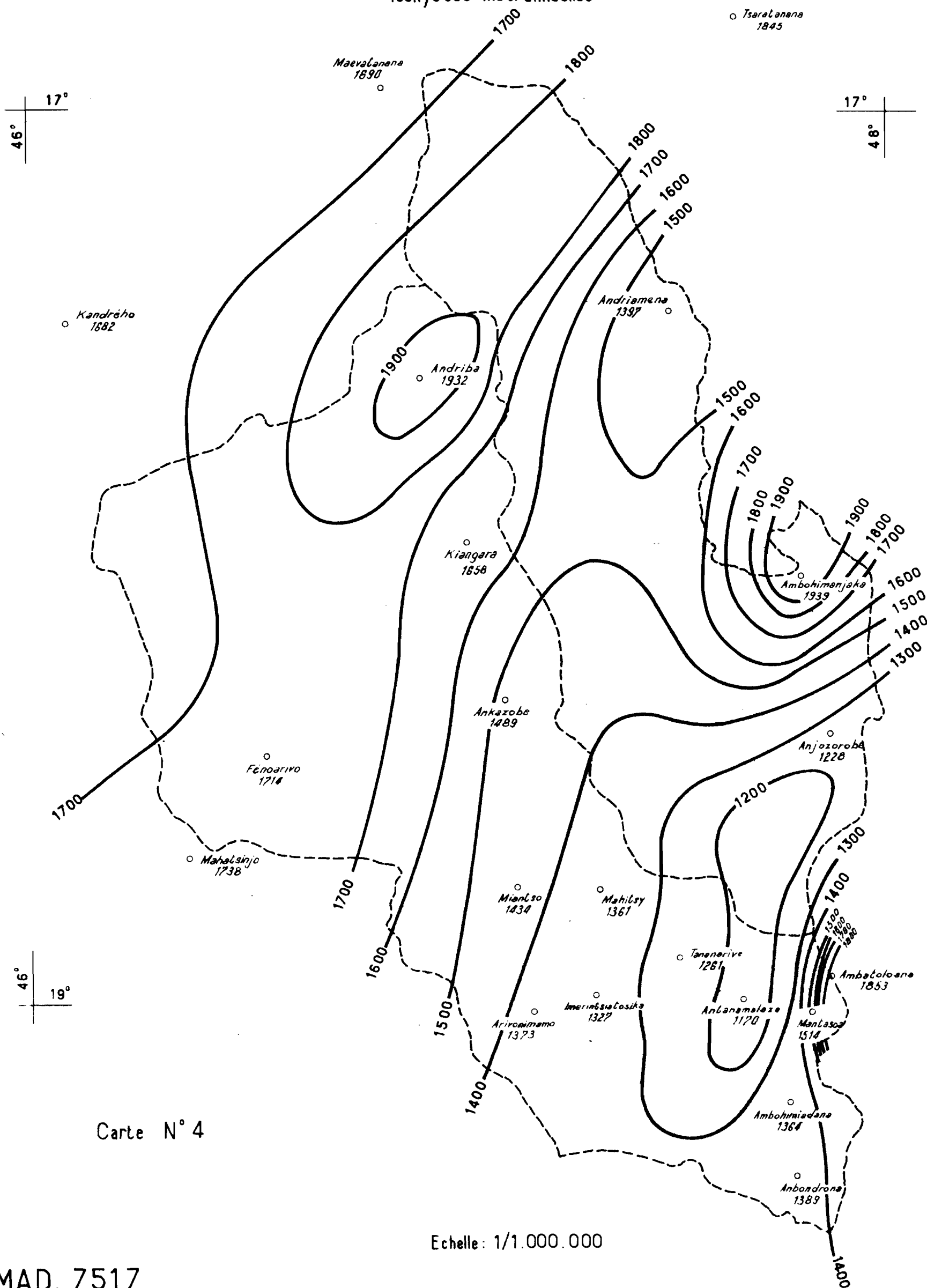
Nous reviendrons en détail sur ce chapitre. La carte 4 représente le réseau d'isohyètes interannuelles établi pour une période d'environ 20 ans (16 à 26 ans suivant les stations). La pluie moyenne sur la BETSIBOKA est de 1530 mm pour cette période et celle de l'IKOPA de 1560 mm. L'écart est plus sensible sur les médianes par suite d'une légère dissymétrie dans la répartition statistique des pluies moyennes annuelles sur le bassin de la BETSIBOKA (sans doute due aux cyclones).

Médiane IKOPA : 1560 mm

Médiane BETSIBOKA: 1475 mm

IKOPA - BETSIBOKA

Pluviométrie
Isohyètes interannuelles



Carte N° 4

Echelle: 1/1.000.000

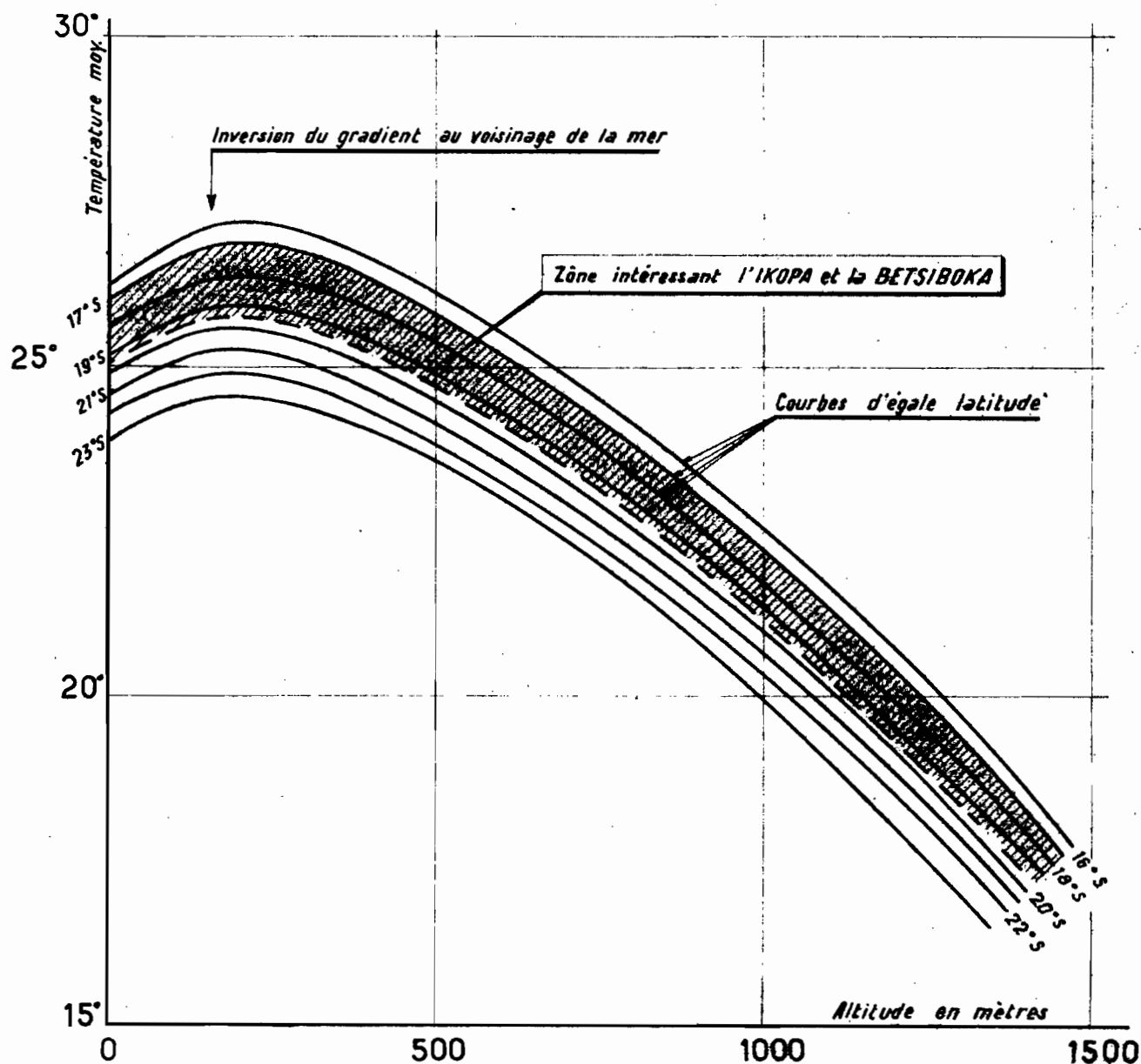
MAD. 7517

MADAGASCAR

Gr. 2

TEMPÉRATURES MOYENNES SUR LE VERSANT OUEST ET SUR LES H^TS PLATEAUX

VARIATION EN FONCTION DE L'ALTITUDE ET DE LA LATITUDE



MAD_7519

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE INSPECTION GÉNÉRALE UNION FRANÇAISE & ÉTRANGER

ED:

LE: AVRIL 58

DES: BROTTARD

VISA:

TUBE N°:

AI

TEMPERATURE :

Nous avons tracé sur le graphique 2 un réseau de courbes donnant approximativement la température moyenne annuelle en un point quelconque du versant Ouest, de la côte Ouest et des Hauts-Plateaux de MADAGASCAR, en fonction de la latitude et de l'altitude. La zone intéressant les bassins étudiés a été hachurée.

L'application de ce réseau donne, pour la BETSIBOKA, une température moyenne sur le bassin de 21°5 contre 19°5 pour l'IKOPA à ANTSTRANA.

Nous avons réuni dans le Tableau I les principales caractéristiques physiques et morphologiques des deux bassins.

TABLEAU I

Caractéristiques :	IKOPA à ANTSTRANA	BETSIBOKA à AMBODIROKA
Superficie	18.650 km ²	11.600 km ²
Indice de pente	0,069	0,078
Altitude moyenne	1.230 m	1.020 m
Pluviométrie annuelle		
moyenne	1.560 mm	1.530 mm
médiane	1.560 mm	1.475 mm
Température moyenne	19,5 °	21,5 °
Exposition	identique	
Végétation	Steppe parfois boisée dans les dépressions	
Géologie	Socle cristallin fortement altéré (latérite)	

Les pentes légèrement plus fortes sur la BETSIBOKA conduiraient à un rendement hydrologique un peu supérieur. Par contre, la température plus élevée augmenterait un peu l'évapotranspiration. Quant à l'écart observé dans la pluviométrie, nous en tiendrons compte au cours de notre étude.

Dans l'ensemble, on peut donc sans trop s'aventurer, appliquer, si le besoin s'en fait sentir, les mêmes coefficients d'écoulement aux deux bassins.

II - ELEMENTS d'INFORMATION

A - IKOPA à ANTISATRANA

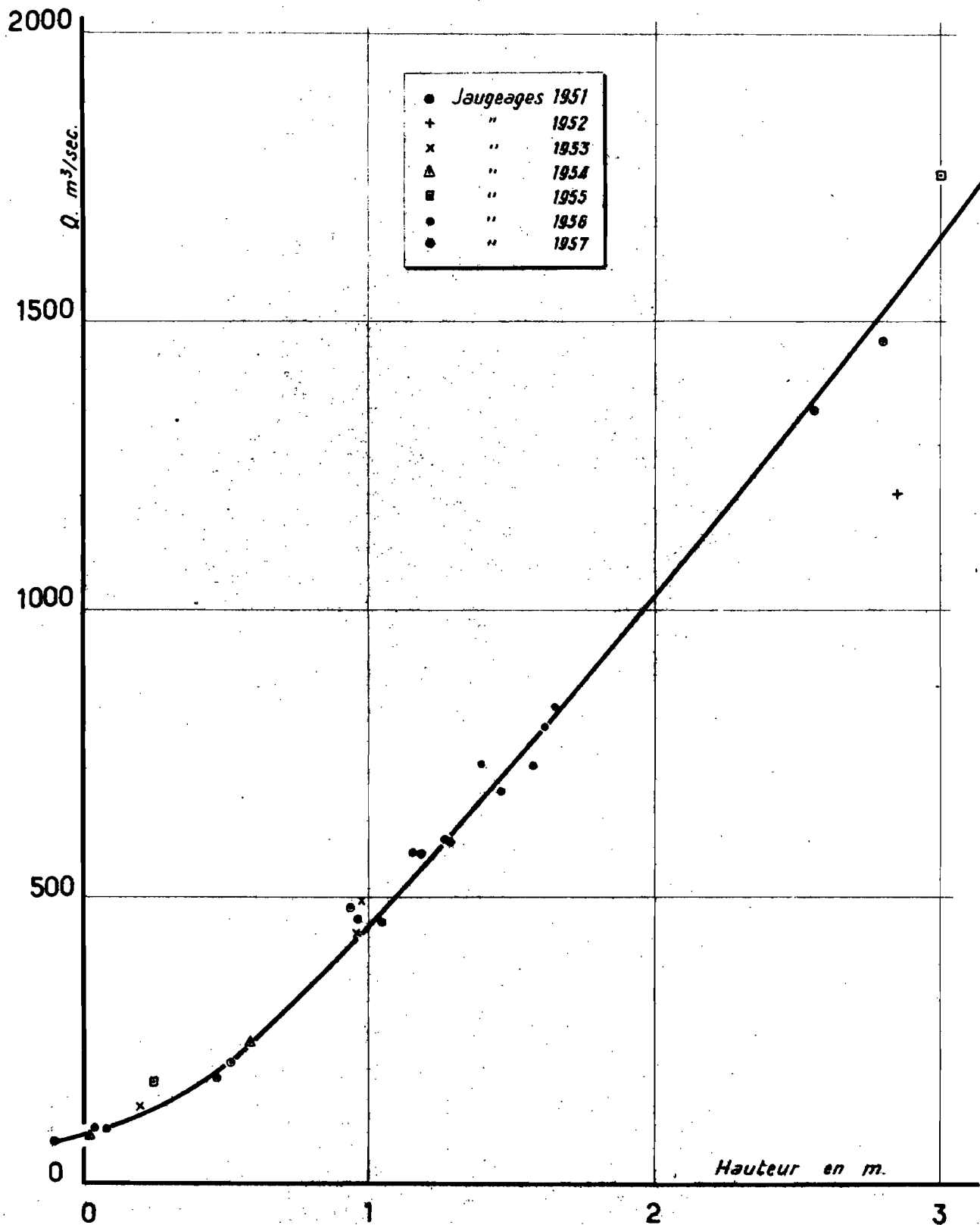
1 - DONNEES HYDROLOGIQUES -

L'échelle d'ANTISATRANA (Longitude : $46^{\circ}53'$ E, latitude $17^{\circ}26'$ E) a été installée par le Service des Travaux Publics en 1948 et doublée d'un limnigraphe. Les lectures ont commencé en Novembre 1948 et le limnigraphe n'a pas fonctionné correctement avant 1954 par suite de l'ensablement continu du puits de mesure insuffisamment surveillé. Les relevés sont à peu près complets : signalons quelques lacunes en Mars 1949, Mai 1951, Septembre et Octobre 1952, Décembre 1955 à Février 1956 et Avril 1956.

L'étude critique des observations nous a amenés à suspecter les cotes données pour les hautes eaux pendant les années hydrologiques 1951-1952, 1952-1953 et 1953-1954 : décrochements insolites lors des décrues, lames d'eau incompatibles avec la pluviométrie. Une enquête sommaire nous a appris que l'élément d'échelle de hautes eaux a été remplacé en 1951 : il est possible qu'il ait été mal calé et calé à nouveau en 1954 à une cote correcte. Les éléments de correction font défaut. Par ailleurs, il semble qu'une certaine fantaisie ait présidé aux observations durant cette période : cotes élevées maintenues régulièrement pendant une durée inhabituelle pour ce cours d'eau. En définitive, nous avons jugé préférable d'éliminer les relevés de ces trois saisons des pluies dans l'étude provisoire qui fait l'objet de cette note. Une enquête plus détaillée sur place permettra peut-être d'en tenir compte à la fin de la campagne de mesures de trois ans actuellement en cours.

L'étalonnage de la station, obtenu au moyen de 27 jaugeages effectués de 1951 à 1957 est assez satisfaisant, malgré une certaine dispersion des résultats et un point aberrant : jaugeage exécuté au flotteur le 29 Janvier 1952. L'extrapolation est faible, mais la dispersion notable des points de hautes eaux interdit de considérer le tarage comme définitif : il devra être complété dans les années à venir. Le graphique 3 représente la courbe d'étalonnage provisoire de la station.

COURBE DE TARAGE



Les principales données hydrologiques recueillies se résument dans les deux tableaux suivants :

TABLEAU II

Débits moyens mensuels (m³/s)

Année hydrol.:	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
1948-1949					187	352	278	1023		395	266	150
1949-1950	135	112	93	120	262	446	978	882	727	293	144	105
1950-1951	108	147	186	225	153	283	1218	722	1021	554		202
1951-1952	161	136	115	133	346	445				654	400	355
1952-1953	182	158			299	703				684	411	274
1953-1954	208	123	93	108	166	689				497	362	253
1954-1955	184	145	112	106	139	575	902	1028	1325	574	241	164
1955-1956	141	130	103	96	100				454		163	136
1956-1957	132	111	96	97	115	575	668	1102	1301	655	262	193

TABLEAU II bis

Caractéristiques du régime

Année hydrol.	Etiage absolu m3/s	Débits caractéristiques m3/s					Crues	
		DCE	DC9	DC6	DC3	DCC	Maximum	Secondaires
1948-49	0			169	404	1267	1583	
1949-50	90	90	106	152	510	1211	1697	1645:1521:
1950-51	90	104	161	250	535	1571	2300	1970:1571:
1951-52	102	105	146	355				
1952-53	90 ?			365				
1953-54	90	90	130	300				
1954-55	100	104	140	191	750	1614	2346	2181:1951:1905:
1955-56	95	95						
1956-57	93	95	100	215	695	1645	2049	2036:2036:1977:

2 - DONNEES PLUVIOMETRIQUES -

Parmi les stations situées à l'intérieur ou au voisinage immédiat du bassin, nous avons sélectionné 16 stations observées pendant une période d'environ 20 ans ou plus. 9 de ces stations ont été retenues pour effectuer les calculs, les 7 autres étant utilisées comme "stations de remplacement" pour combler les lacunes existant dans les observations des premières. On obtient ainsi une répartition géographique pas trop hétérogène et une période d'observations continues couvrant 20 années hydrologiques, de 1937-1938 à 1956-1957.

Les stations utilisées figurent sur la carte des isohyètes annuelles et nous les avons rassemblées dans le tableau III.

TABEAU III

IKOFA - Stations pluviométriques

Stations dites "principales"				Stations de remplacement correspondantes			
Coordonnées		Périodes		Coordonnées		Périodes	
Noms des stations	Lat.S	Long.E	d'observations	Noms des stations	Lat.S	Long.E	d'observations
AMBATOLOANA	18° 55'	47° 53'	1934-1957	MANTASOA	19° 01'	47° 50'	1934-1957
AMBONDRONA	19° 23'	47° 48'	1938-1957	AMBOHIMIADANA	19° 13'	47° 47'	1934-1957
ANDRIBA	17° 36'	46° 57'	1934-1957	MAHATSINJO	17° 44'	47° 02'	1938-1957
ANKAZOBE	18° 17'	47° 07'	1921-1957	KIANGARA	17° 58'	47° 02'	1936-1957
ARIVONIMAMO	19° 02'	47° 10'	1938-1957	IMERINTSIATOSIKA	18° 58'	47° 18'	1938-1957
MIANTSO	18° 43'	47° 08'	1934-1957	MAHITSY	18° 41'	47° 21'	1938-1957
TANANARIVE SCM	18° 55'	47° 32'	1939-1957	ANTANAMALAZA	18° 58'	47° 41'	1938-1957
FENOARIVO Ouest	18° 27'	46° 33'	1934-1957	ANKAZOBE			
KANDREHO	17° 28'	46° 05'	1933-1955	ANDRIBA			

Les résultats de ces stations ont servi à calculer les pluies moyennes mensuelles sur le bassin pendant la période de 20 ans précitée. Le calcul a été fait par moyennes arithmétiques pondérées suivant la méthode de THIESSEN. Les coefficients de pondération trouvés pour les différentes stations sont les suivants :

AMBATOLAONA	0,04
AMBONDRONA-ECOLE	0,09
ANDRIBA	0,16
ANKAZOBE	0,15
ARIVONIMAMO	0,09
MIANTSO	0,12
TANANARIVE SCM	0,10
FENOARIVO-Ouest	0,22
KANDREHO	0,03

Nous avons admis les mêmes coefficients pour les stations de remplacement. On obtient ainsi les chiffres consignés dans le tableau IV.

TABLEAU IV

Pluie moyenne sur le B.V. de l'IKOPA

à ANTSAFRANA

Année : hydrol.	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Total : annuel
1937-38	5	42	35	36	116	293	226	372	133	118	1	4	1381
1938-39	6	3	4	20	124	288	497	326	407	74	12	6	1767
1939-40	31	7	30	42	238	451	287	305	180	55	5	5	1636
1940-41	11	25	11	89	109	438	586	401	335	33	10	23	2071
1941-42	21	18	19	95	92	207	400	342	127	45	11	17	1394
1942-43	9	16	18	82	174	320	597	245	233	94	3	3	1794
1943-44	5	3	8	39	52	277	193	316	354	91	14	16	1368
1944-45	23	2	7	72	103	354	287	332	260	93	24	3	1560
1945-46	6	6	6	92	105	232	340	388	320	46	17	10	1568
1946-47	8	23	8	112	348	251	404	303	304	105	24	7	1897
1947-48	3	16	5	77	105	283	444	276	163	93	38	25	1528
1948-49	13	3	41	71	121	184	111	418	281	32	48	8	1331
1949-50	17	3	15	50	145	191	414	194	239	26	17	4	1315
1950-51	5	11	6	36	178	256	497	159	339	44	36	9	1576
1951-52	7	27	1	53	217	187	401	300	251	66	45	10	1565
1952-53	2	9	20	17	178	235	249	273	369	38	10	10	1410
1953-54	6	10	12	29	103	321	379	262	181	21	5	4	1333
1954-55	2	1	5	32	160	282	360	316	431	17	8	4	1618
1955-56	5	16	3	52	127	411	349	260	122	93	9	4	1451
1956-57	29	1	13	31	179	352	208	352	429	51	13	4	1662

B - BETSIBOKA à AMBODIROKA

I - DONNEES HYDROLOGIQUES -

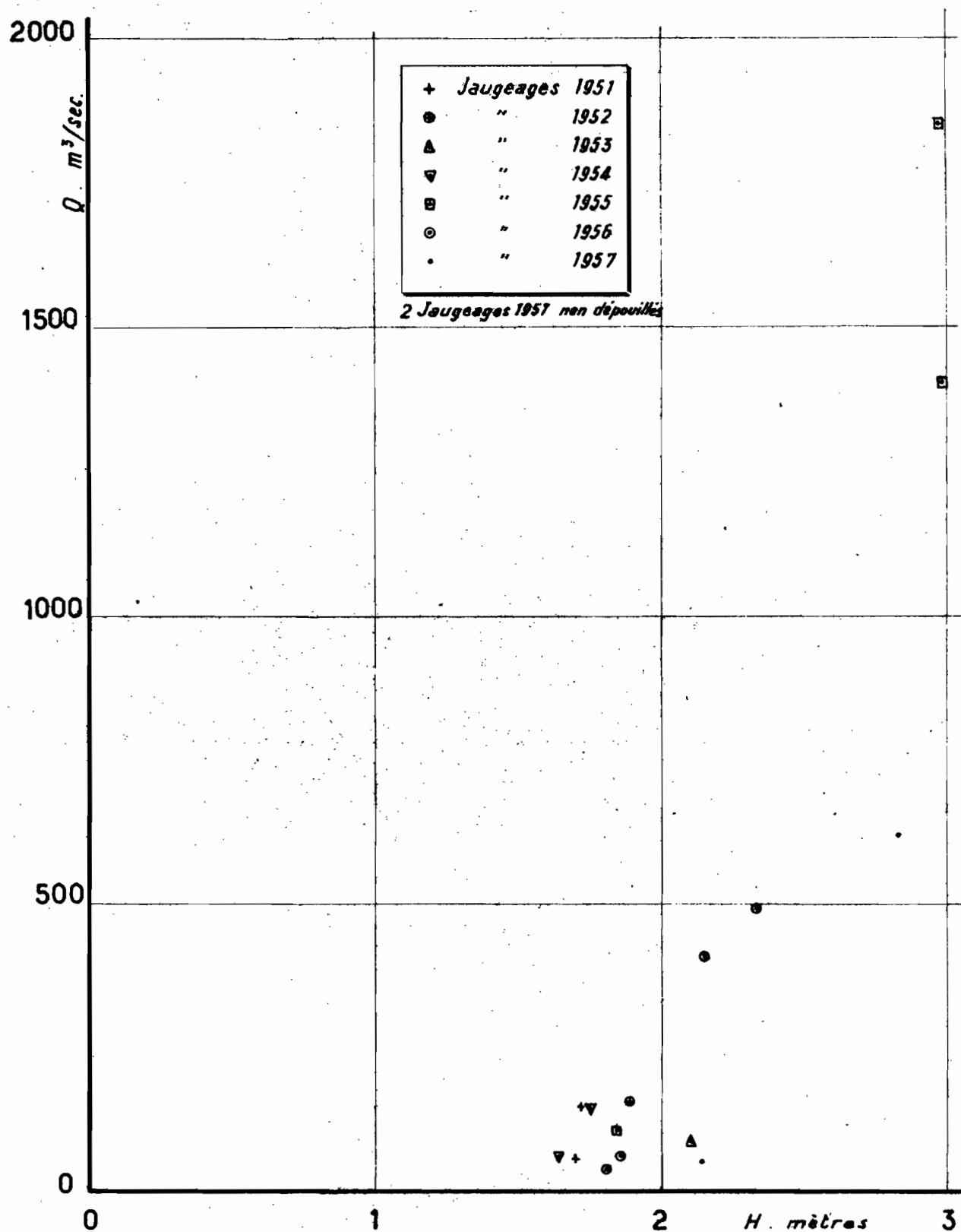
L'échelle d'AMBODIROKA (Longitude : 47°01'E, Latitude : 16°55'S) a été installée en 1951. Dix sept jaugeages ont été effectués de 1951 à 1957 : ils sont représentés sur le graphique 4. La dispersion est telle qu'il est impossible de tracer une courbe d'étalonnage : aucun essai d'interprétation n'a donné de résultats vraiment satisfaisants. Cela tient à l'extrême mobilité du lit à l'endroit de l'échelle. Une nouvelle station, dite "échelle amont" a été installée en 1957 à l'amont des rapides : son lit est stable.

En attendant d'avoir un nombre suffisant de résultats utilisables, nous avons déterminé les débits à partir de la pluviométrie en utilisant les mêmes corrélations pluies-débits que sur l'IKOPA. Nous avons vu précédemment que cette méthode peut se justifier. Les résultats déduits des jaugeages de basses eaux et représentant seuls quelque vraisemblance, conduisent à des lames d'eau comparables aux lames d'eau calculées quoique légèrement plus fortes (de 15 % en moyenne).

2 - DONNEES PLUVIOMETRIQUES -

Sept stations ont été utilisées; elles figurent dans le tableau V, avec leurs coefficients de pondération. Les observations manquantes ont été remplacées par celles des autres stations présentant le plus d'analogies avec la station déficiente.

"ÉTALONNAGE" de la BETSIBOKA à AMBODIROKA



MAD. 7521

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE INSPECTION GÉNÉRALE UNION FRANÇAISE & ÉTRANGER

ED:

LE: AVRIL 58

DES: BROTTARD

VISA:

TUBE N°:

A1

TABLEAU V

Stations	Coordonnées		Périodes d'observ.	Coefficient de pondération
	Lat. S.	Long. E		
AMBOHIMANJAKA	18°04'	47°49'	1935-1957	0,16
ANDRIAMENA	17°27'	47°30'	1935-1957	0,21
ANDRIBA	17°36'	46°57'	1934-1957	0,10
ANJOZOROBE	18°23'	47°53'	1938-1957	0,18
ANKAZOBE	18°17'	47°07'	1921-1957	0,15
MAEVATANANA	16°57'	46°50'	1921-1957	0,10
MAHITSY	18°44'	47°21'	1938-1957	0,10

Les mêmes calculs que pour l'IKOPA conduisent aux pluies moyennes sur le bassin consignées dans le Tableau VI.

TABIEAU VI

Pluies moyennes sur le B.V. de la BETSIBOKA
à AMBODIROKA

Année :	J :	F :	M :	A :	M :	J :	Total :
hydrol. :	:	:	:	:	:	:	annuel :
1937-38 :	10 :	28 :	24 :	31 :	83 :	226 :	242 :
1938-39 :	7 :	3 :	8 :	13 :	117 :	234 :	433 :
1939-40 :	19 :	8 :	15 :	24 :	196 :	496 :	351 :
1940-41 :	10 :	22 :	9 :	100 :	65 :	457 :	725 :
1941-42 :	13 :	22 :	8 :	105 :	69 :	210 :	430 :
1942-43 :	4 :	11 :	5 :	83 :	170 :	259 :	496 :
1943-44 :	7 :	3 :	14 :	15 :	25 :	265 :	190 :
1944-45 :	21 :	0 :	10 :	77 :	108 :	362 :	296 :
1945-46 :	7 :	10 :	5 :	43 :	93 :	231 :	349 :
1946-47 :	20 :	15 :	7 :	75 :	337 :	243 :	361 :
1947-48 :	7 :	20 :	7 :	38 :	91 :	262 :	480 :
1948-49 :	21 :	13 :	27 :	87 :	143 :	184 :	80 :
1949-50 :	20 :	2 :	14 :	38 :	170 :	172 :	381 :
1950-51 :	6 :	2 :	5 :	45 :	156 :	260 :	644 :
1951-52 :	4 :	23 :	1 :	47 :	217 :	168 :	394 :
1952-53 :	3 :	23 :	30 :	20 :	187 :	262 :	284 :
1953-54 :	4 :	22 :	7 :	19 :	137 :	365 :	432 :
1954-55 :	14 :	12 :	15 :	16 :	134 :	234 :	307 :
1955-56 :	18 :	12 :	7 :	52 :	86 :	333 :	357 :
1956-57 :	24 :	6 :	6 :	10 :	249 :	346 :	163 :

III - ETUDE des MODULES et des DEBITS MOYENS MENSUELS

Les éléments demandés pour l'établissement de l'avant projet comportent les débits moyens mensuels et annuels de l'année médiane et de l'année décennale sèche. Nous avons pris comme définition de cette dernière, une année ayant un module de probabilité au non dépassement 0,10 et une répartition des débits mensuels semblable à celui de l'année médiane. Ce chapitre comportera donc :

- l'étude des corrélations entre débits moyens mensuels et pluies moyennes mensuelles.
- l'extension des observations hydrologiques à une période de 20 ans au moyen des corrélations et des pluies mensuelles calculées précédemment.
- l'étude statistique de l'ensemble obtenu et les résultats pour les années médiane et décennale sèche.

Pour la BETSIBOKA, on calculera directement les débits moyens mensuels à partir des pluies en utilisant les corrélations trouvées pour l'IKOPA.

A - L'IKOPA à MITSATRAHA

I - CORRELATIONS PLUIES - DEBITS -

Pour rendre les formules homogènes, nous utiliserons non pas les débits mais les lames d'eau équivalentes déduites de ces débits. On obtient ainsi le tableau suivant :

TABLEAU VII

Lames d'eau mensuelles observées à ANTISATRANA (en mm)

Année	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
1948-49	-	-	-	-	26,0	50,7	40,0	133,0	-	54,9	38,3	20,9
1949-50	19,5	16,1	12,9	17,3	36,4	64,2	140,8	114,7	104,7	40,7	20,7	14,6
1950-51	15,6	21,2	25,9	32,4	21,3	40,8	175,4	93,9	147,1	77,0		28,1
1951-52	23,2	19,6	16,0	19,2	48,1	64,1	-	-	-	90,9	57,6	49,3
1952-53	26,2	22,8	-	-	41,6	101,2	-	-	-	95,1	59,2	38,1
1953-54	30,0	17,7	12,9	15,6	23,1	99,2	-	-	-	69,1	52,1	35,2
1954-55	26,5	20,9	15,6	15,3	19,3	82,8	129,9	133,6	190,8	79,8	34,7	22,8
1955-56	20,3	18,7	14,3	13,8	-	-	-	-	65,4	-	23,5	18,9
1956-57	19,0	16,0	13,3	14,0	16,0	82,8	96,2	143,3	187,3	91,0	37,7	26,8

La lame d'eau d'un mois déterminé dépend non seulement de la pluie moyenne sur le bassin tombée ce mois, mais également de la pluviométrie des mois précédents. Si l'on désigne par P_0, P_1, P_2, P_3 , etc..... la pluie du mois considéré, du mois précédent $M-1$, du mois $M-2$, du mois $M-3$ etc.... et si l'on admet une relation linéaire entre pluie et lame d'eau, la relation d'interdépendance peut s'écrire : (H = lame d'eau)

$$H = a P_0 + b P_1 + c P_2 + \dots$$

L'ajustement des coefficients a, b, c, \dots s'obtient en appliquant à la fonction $H (P_0, P_1, \dots)$ la méthode des moindres carrés. On obtient ainsi le système linéaire

$$a \sum P_{0i}^2 + b \sum P_{1i} P_{0i} + c \sum P_{2i} P_{0i} + \dots = \sum H_i P_{0i}$$

$$a \sum P_{0i} P_{1i} + b \sum P_{1i}^2 + c \sum P_{2i} P_{1i} + \dots = \sum H_i P_{1i}$$

$$a \sum P_{0i} P_{2i} + b \sum P_{1i} P_{2i} + c \sum P_{2i}^2 + \dots = \sum H_i P_{2i}$$

.....

permettant de calculer a, b, c, \dots ; $H_i, P_{0i}, P_{1i}, \dots$ désignent les différentes valeurs expérimentales trouvées pour H, P_0, P_1, \dots

En principe, un coefficient est d'autant plus fort que la pluie du mois correspondant a d'autant plus d'influence sur la lame d'eau du mois étudié. On pourrait croire que la meilleure vraisemblance serait obtenue en introduisant le plus possible de paramètres, les coefficients tendant vers zéro pour une influence nulle ou très faible. En fait, étant donné le faible nombre d'observations simultanées, la probabilité de coïncidences fortuites n'est pas négligeable et il faut éviter d'introduire des P indépendants ou présentant une corrélation très lâche avec H .

De plus, le volume des calculs croît très vite avec le nombre de paramètres au point de les rendre impraticables au-delà du 4ème ordre. Nous réduirons donc au strict minimum le nombre de mois susceptibles d'avoir une influence sur l'écoulement H.

Pour la fin de la décrue ou le début de l'étiage, il est inutile de tenir compte de la pluviométrie du mois considéré dont la lame d'eau dépend à peu près uniquement des derniers mois de hautes eaux. La lame d'eau des mois d'étiage ou suivant immédiatement les basses eaux, dépend à la fois de la pluviométrie du mois et de la lame d'eau du mois précédent; dans ce cas, le calcul des lames d'eau se fera par récurrence.

Après quelques tâtonnements pour la recherche des influences, nous sommes arrivés, en appliquant chaque fois la méthode des moindres carrés, aux résultats suivants (lames d'eau et pluies en mm).

Lame d'eau de Juillet

$$H = 0,123 P_0 + 0,0393 P_1 + 0,0221 P_2$$

P_0 : pluie d'Avril

P_1 : " de Mars

P_2 : " de Février

Lame d'eau d'Août

$$H = 0,256 P_0 + 0,272 P_1 + 0,478 P_2$$

P_0 : pluie d'Août

P_1 : " de Juillet

P_2 : lame d'eau de Juin

Lame d'eau de Septembre

$$H = 0,083 P_0 + 0,121 P_1 + 0,519 P_2$$

P_0 : pluie de Septembre

P_1 : " d'Août

P_2 : lame d'eau de Juillet

Lame d'eau d'Octobre

$$H = 0,128 P_0 + 0,524 P_1$$

P_0 : pluie d'Octobre + pluie de Septembre

P_1 : Lame d'eau d'Août

Lame d'eau de Novembre

$$H = 0,146 P_0 + 0,112 P_1 + 0,087 P_2$$

P_0 : pluie de Novembre

P_1 : " d'Octobre

P_2 : " de Septembre

Lame d'eau de Décembre

$$H = 0,241 P_0 + 0,075 P_1$$

P_0 : pluie de Décembre

P_1 : " de Novembre

Lame d'eau de Janvier

$$H = 0,308 P_0 + 0,077 P_1$$

P_0 : pluie de Janvier

P_1 : " de Décembre

Lame d'eau de Février

$$H = 0,273 P_0 + 0,084 P_1 + 0,072 P_2$$

P_0 : pluie de Février

P_1 : " de Janvier

P_2 : " de Décembre

Lame d'eau de Mars

$$H = 0,394 P_0 + 0,050 P_1 + 0,009 P_2$$

P_0 : pluie de Mars

P_1 : " de Février

P_2 : " de Janvier

Lame d'eau d'Avril

$$H = 0,680 P_0 + 0,124 P_1 + 0,035 P_2$$

P_0 : pluie d'Avril

P_1 : " de Mars

P_2 : " de Février

Lame d'eau de Mai

$$H = 0,076 P_0 + 0,034 P_1 + 0,089 P_2$$

P_0 : pluie d'Avril

P_1 : " de Mars

P_2 : " de Février

Lame d'eau de Juin

$$H = 0,184 P_0 + 0,0347 P_1 + 0,0337 P_2$$

P_0 : pluie d'Avril

P_1 : " de Mars

P_2 : " de Février

Les valeurs des divers coefficients sont particulièrement intéressantes :

- En Juillet, on vérifie l'influence très grande du dernier mois de saison des pluies.
- En Août - Septembre - Octobre, l'influence des débits du mois précédent devient prépondérante, mais malgré leur faible valeur, les précipitations de saison sèche n'ont pas une influence négligeable pendant ces trois mois.
- En Décembre et Janvier, les pluies du mois en cours sont tout à fait prépondérantes, ceci tient au fait qu'elles sont beaucoup plus fortes que celles du mois précédent. Ce phénomène s'accroît en Février, Mars et Avril, le terrain étant saturé, les précipitations de ces mois rencontrent des coefficients d'écoulement très supérieurs à ceux de Décembre et Janvier.

- En Mai et Juin, les précipitations des mois en cours sont sans influence vis à vis des trois mois les plus rapprochés de la saison des pluies : Février, Mars, Avril; en Juin, l'influence des deux premiers mois diminue nettement par rapport à Avril, ce qui est normal.

L'extension, au moyen de ces formules, de la période d'observations hydrologiques à la période d'observations pluviométriques donne les tableaux VIII (Lames d'eau mensuelles et annuelles par année hydrologique) et IX (Lames d'eau mensuelles classées).

TABLEAU VIII

IKOPA à ANTSATRANA

Lames d'eau mensuelles et annuelles

: Année :	J :	A :	S :	O :	N :	D :	J :	F :	M :	A :	M :	J :	: Année :
:hydrol.:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1937-38:	30,0:	25,0:	16,0:	22,0:	24,0:	79,3:	92,2:	141,6:	73,0:	109,8:	46,6:	38,9:	698 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1938-39:	28,0:	21,0:	15,2:	14,1:	20,7:	78,7:	175,3:	151,5:	181,1:	112,2:	48,5:	38,7:	885 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1939-40:	32,3:	28,7:	20,1:	24,3:	42,1:	126,5:	123,1:	139,8:	88,8:	70,4:	37,4:	26,6:	760 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1940-41:	20,6:	22,1:	14,6:	24,4:	26,8:	113,7:	214,2:	190,2:	157,3:	78,0:	49,6:	31,2:	943 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1941-42:	26,1:	25,2:	17,3:	27,8:	25,7:	56,8:	139,1:	141,9:	70,7:	58,3:	38,2:	24,2:	651 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1942-43:	18,1:	18,1:	12,8:	22,3:	36,2:	90,2:	208,5:	140,1:	109,4:	101,4:	36,9:	33,6:	828 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1943-44:	26,1:	18,2:	14,6:	15,6:	12,7:	70,7:	80,8:	102,5:	157,0:	116,8:	47,1:	39,7:	702 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1944-45:	32,1:	25,7:	17,5:	23,6:	23,7:	93,0:	115,7:	140,2:	121,6:	107,1:	45,5:	37,3:	783 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1945-46:	29,0:	21,0:	16,3:	23,5:	26,2:	63,8:	122,6:	151,2:	148,5:	84,5:	48,9:	32,6:	768 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1946-47:	26,8:	23,6:	17,4:	27,7:	64,0:	86,6:	143,8:	134,7:	138,6:	119,7:	45,3:	40,1:	868 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1947-48:	31,6:	24,1:	18,8:	23,1:	24,4:	76,1:	158,5:	133,0:	82,0:	93,1:	37,2:	32,1:	734 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1948-49:	23,9:	15,7:	16,2:	22,6:	26,0:	50,7:	40,0:	133,0:	132,6:	54,9:	38,3:	20,9:	575 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1949-50:	19,5:	16,1:	12,9:	17,3:	36,4:	64,2:	140,8:	114,7:	104,7:	40,7:	20,7:	14,6:	607 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1950-51:	15,6:	21,2:	25,9:	32,4:	21,3:	40,8:	175,4:	93,9:	147,1:	77,0:	29,0:	28,1:	708 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1951-52:	23,2:	19,6:	16,0:	19,2:	48,1:	64,1:	137,9:	129,0:	117,5:	90,9:	57,6:	49,3:	772 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1952-53:	26,6:	22,8:	16,3:	16,7:	41,6:	101,2:	94,8:	112,4:	161,3:	95,1:	59,2:	38,1:	786 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1953-54:	30,0:	17,7:	12,9:	15,6:	23,1:	99,2:	141,4:	126,5:	87,8:	69,1:	52,1:	35,2:	711 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1954-55:	26,5:	20,9:	15,6:	15,3:	19,3:	82,8:	129,9:	133,6:	190,0:	79,0:	34,7:	22,8:	772 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1955-56:	20,3:	18,7:	14,3:	13,8:	24,6:	108,6:	139,1:	129,9:	65,4:	87,5:	23,5:	18,9:	665 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1956-57:	19,0:	16,0:	13,3:	14,0:	16,0:	82,8:	96,2:	143,3:	187,3:	91,0:	37,7:	26,8:	743 :
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

IKOPA à ANTSATRANA

Lames d'eau mensuelles classées

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
	32,3	28,7	25,9	32,4	64,0	126,5	214,2	190,2	190,8	119,7	59,2	49,3
	32,1	25,7	20,1	27,8	48,1	113,7	208,5	151,5	187,3	116,8	57,6	40,1
	31,6	25,2	18,8	27,7	42,1	108,6	175,4	151,2	181,1	112,2	52,1	39,7
	30,0	25,0	17,5	24,4	41,6	101,2	175,3	143,3	161,3	109,8	49,6	38,9
	30,0	24,1	17,4	24,3	36,4	99,2	158,5	141,9	157,3	107,1	48,9	38,7
	29,0	23,6	17,3	23,6	36,2	93,0	143,8	141,6	157,0	101,4	48,5	38,1
	28,0	22,8	16,3	23,5	26,8	90,2	141,4	140,2	148,5	95,1	47,1	37,3
	26,8	22,1	16,3	23,1	26,2	86,6	140,8	140,1	147,1	93,1	46,6	35,2
	26,6	21,2	16,2	22,6	26,0	82,8	139,1	139,8	138,6	91,0	45,5	33,6
	26,5	21,0	16,0	22,3	25,7	82,8	139,1	134,7	132,6	90,9	45,3	32,6
	26,1	21,0	16,0	22,0	24,6	79,3	137,9	133,6	121,6	87,5	38,3	32,1
	26,1	20,9	15,6	19,2	24,4	78,7	129,9	133,0	117,5	84,5	38,2	31,2
	23,9	19,6	15,2	17,3	24,0	76,1	123,1	133,0	109,4	79,8	37,7	28,1
	23,2	18,7	14,6	16,7	23,7	70,7	122,6	129,9	104,7	78,0	37,4	26,8
	20,6	18,2	14,6	15,6	23,1	64,2	115,7	129,0	88,8	77,0	37,2	26,6
	20,3	18,1	14,3	15,6	23,1	64,1	96,2	126,5	87,8	70,4	36,9	24,2
	19,5	17,7	13,3	15,3	20,7	63,8	94,8	114,7	82,0	69,1	34,7	22,8
	19,0	16,1	12,9	14,1	19,3	56,8	92,2	112,4	73,0	58,3	29,0	20,9
	18,1	16,0	12,9	14,0	16,0	50,7	80,8	102,5	70,7	54,9	23,5	18,9
	15,6	15,7	12,8	13,8	12,7	40,8	40,0	93,9	65,4	40,7	20,7	14,6
Moyennes:	25,2	21,1	16,2	20,8	29,2	81,4	133,5	134,1	126,1	86,9	41,7	31,5
Médianes:	26,2	21,0	16,0	22,1	25,2	81,0	138,5	134,2	127,4	89,2	41,8	32,4

2 - ETUDE STATISTIQUE des LAMES d'EAU ANNUELLES -

Supposons les lames d'eau annuelles du Tableau VIII classées par grandeurs décroissantes. Considérons la lame d'eau de rang n : sa fréquence au dépassement intéresse la tranche comprise entre cette lame d'eau et celle qui la précède immédiatement, c'est-à-dire la lame d'eau de rang $n-1$. Si l'on admet que la loi de répartition statistique de l'échantillon est la même que la loi de probabilité d'un nombre infini d'observations, on doit donc attribuer à la lame d'eau de rang n une fréquence expérimentale au dépassement comprise

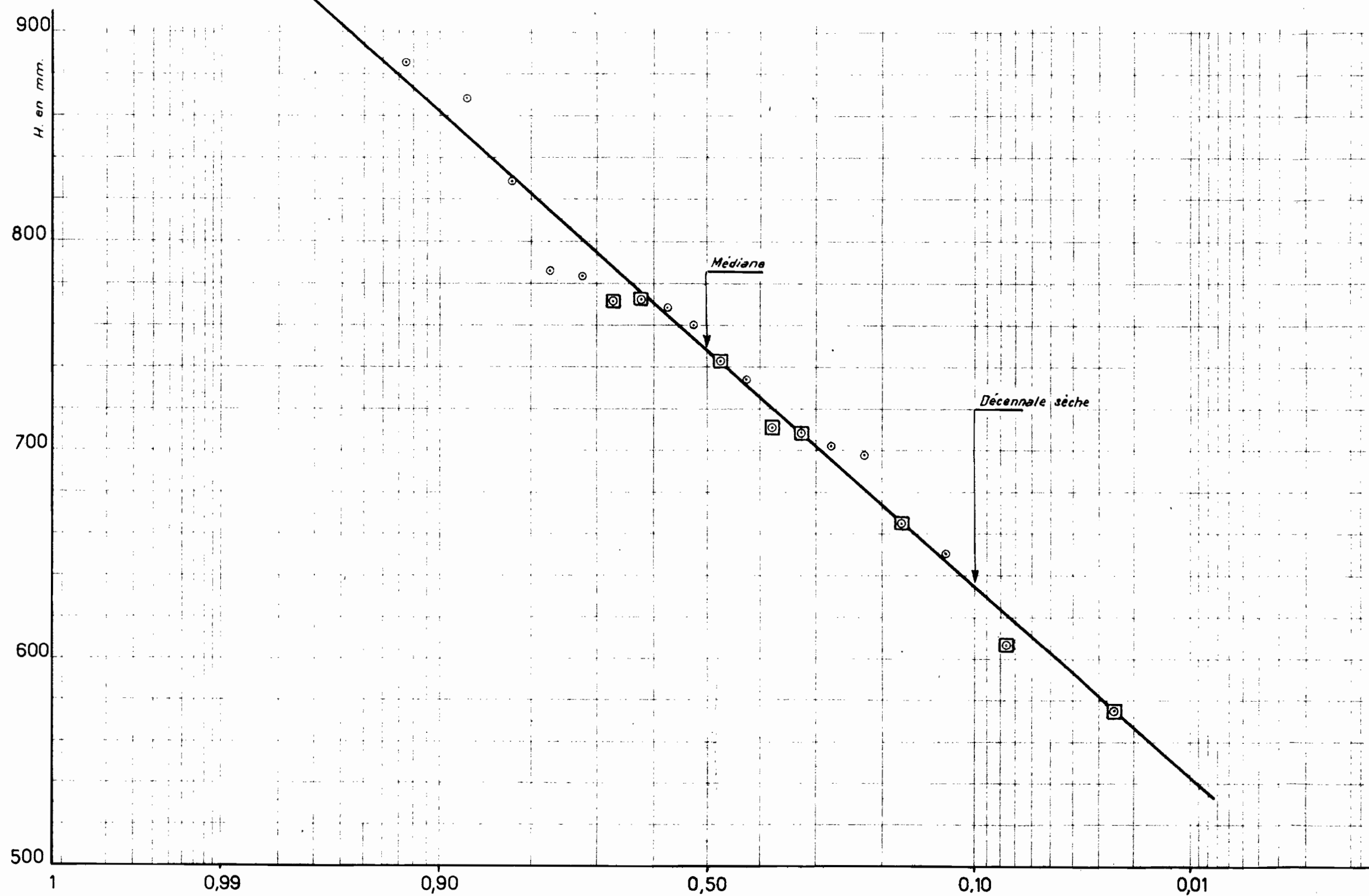
entre $\frac{n}{N}$ et $\frac{n-1}{N}$, N étant le nombre d'observations contenues dans l'échantillon; nous prendrons, comme la plus vraisemblable, la valeur moyenne de ces deux nombres

soit : $\frac{n - \frac{1}{2}}{N}$. On obtient pour l'IKOPA à ANTSTRANA les fréquences naturelles suivantes : (F_1 , fréquence au dépassement, F_2 , fréquence au non dépassement).

TABLEAU X

N°	H classée	F ₁	F ₂	N°	H classée	F ₁	F ₂
1	943	0,025	0,975	11	743	0,525	0,475
2	885	0,075	0,925	12	734	0,575	0,425
3	868	0,125	0,875	13	711	0,625	0,375
4	828	0,175	0,825	14	708	0,675	0,325
5	786	0,225	0,775	15	702	0,725	0,275
6	783	0,275	0,725	16	698	0,775	0,225
7	772	0,325	0,675	17	665	0,825	0,175
8	772	0,375	0,625	18	651	0,875	0,125
9	768	0,425	0,575	19	607	0,925	0,075
10	760	0,475	0,525	20	575	0,975	0,025

Répartition statistique des lames d'eau annuelles



Supposons, a priori, que cette répartition statistique suive la loi de GAUSS : l'ajustement se fait immédiatement par le calcul des moments :

$$\bar{H} = \frac{1}{20} \sum H_i = 748 \text{ mm}$$

$$\mu_2 = \sigma^2 = \frac{1}{20} \sum (H_i - \bar{H})^2 = 7741$$

$$\sigma = 88,0 \text{ mm}$$

D'où la variable réduite de GAUSS $x = \frac{H - 748}{88,0}$

La courbe représentative de la répartition théorique :

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

est portée sur le graphique 5 ainsi que les lames d'eau calculées ou observées (encadrées sur le graphique). On voit que la dispersion est faible, ce qui justifie notre hypothèse.

3 - RÉSULTATS -

On déduit du graphique la lame d'eau annuelle décennale sèche : 634 mm et médiane : 748 mm. La répartition des lames d'eau mensuelles est tirée du Tableau IX. Les résultats sont consignés dans le Tableau XI.

Ces lames d'eau annuelles correspondent aux débits suivants :

Année médiane : 443 m³/s (Contre 477 avancés dans sa note par M. RIVET).

Décennale sèche : 375 m³/s.

TABLEAU XI

IKOPA à ANTSATRANA

(S.BV = 18.650 km²)

Année médiane

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Année
Lames d'eau mm	25,9	20,8	15,9	21,9	25,0	80,2	137,1	133,0	126,2	88,4	41,4	32,1	748
Débits moyens m ³ /sec.	180	145	114	152	180	558	955	1025	879	636	288	231	443

Année décennale sèche

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Année
Lames d'eau mm	22,0	17,6	13,4	18,6	21,2	68,0	116,3	112,7	107,0	74,9	35,1	27,2	634
Débits moyens m ³ /sec.	153	123	96	129	152	473	810	869	745	539	244	196	375

Coefficient de variation :
(irrégularité interannuelle)

= 0,118

B - La BETSIBOKA à AIBODIROKA

1 - CALCUL des LAMES d'EAU MENSUELLES et ANNUELLES -

Nous avons utilisé, pour calculer les lames d'eau mensuelles à partir de la pluviométrie, les formules de corrélation trouvées pour l'IKOPA. Les résultats sont consignés dans les tableaux XII (lames d'eau mensuelles et annuelles suivant les années hydrologiques) et XIII (lames d'eau mensuelles classées).

2 - ETUDE STATISTIQUE des LAMES d'EAU ANNUELLES -

Nous ferons les mêmes remarques que pour l'IKOPA. De plus, nous avons éliminé l'année 1940-1941 qui nous semble donner une lame d'eau trop élevée due à des précipitations exceptionnelles dans la partie basse du bassin en Janvier 1941 (plus de 1500 mm à certaines stations). Même si les résultats sont exacts, leur introduction dans une répartition symétrique donnerait pour la médiane une valeur faussement exagérée. Les fréquences naturelles, portant cette fois sur 19 années, sont portées dans le tableau XIV (F_1 , fréquence au dépassement, F_2 , fréquence au non dépassement).

TABLEAU XII

BETSIBOKA à AMBODIROKA

Lames d'eau mensuelles et annuelles (calculées)

Année :	J :	A :	S :	O :	N :	D :	J :	F :	M :	A :	M :	J :	Année :
hydrol.:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
1937-38:	28,4:	26,4:	20,1:	20,9:	17,7:	60,7:	91,9:	157,3:	80,2:	91,6:	50,7:	35,6:	682 :
1938-39:	25,9:	19,7:	14,5:	13,0:	19,2:	65,2:	151,4:	135,1:	141,0:	80,2:	40,7:	29,3:	735 :
1939-40:	24,5:	21,2:	14,9:	16,1:	32,6:	134,2:	146,3:	170,3:	110,3:	84,0:	46,6:	32,3:	833 :
1940-41:	25,0:	23,8:	16,4:	26,4:	21,5:	115,0:	258,5:	209,0:	140,7:	63,3:	48,8:	27,7:	976 :
1941-42:	22,9:	22,4:	15,2:	26,2:	22,5:	55,8:	148,6:	137,2:	72,4:	67,9:	37,4:	26,9:	655 :
1942-43:	20,0:	16,8:	12,1:	20,1:	34,6:	75,2:	172,7:	141,7:	105,3:	102,1:	41,2:	35,1:	777 :
1943-44:	26,8:	19,4:	15,4:	13,9:	6,5:	65,7:	78,9:	125,1:	162,8:	132,5:	50,3:	44,3:	742 :
1944-45:	35,4:	26,9:	19,2:	25,2:	25,3:	95,3:	119,0:	143,5:	114,6:	94,1:	44,2:	34,0:	777 :
1945-46:	26,4:	20,7:	15,3:	17,0:	18,8:	62,6:	125,3:	142,9:	121,0:	70,4:	43,2:	28,0:	692 :
1946-47:	22,6:	22,7:	14,1:	22,4:	58,2:	83,8:	129,9:	148,0:	124,0:	131,4:	51,2:	44,8:	853 :
1947-48:	33,9:	28,4:	20,6:	20,6:	18,2:	70,0:	168,0:	137,5:	79,3:	66,5:	35,0:	25,1:	703 :
1948-49:	19,2:	21,0:	13,8:	25,6:	33,0:	55,1:	38,8:	125,3:	153,6:	84,1:	49,1:	32,5:	651 :
1949-50:	27,0:	21,5:	15,4:	17,9:	30,3:	54,2:	130,6:	116,2:	110,7:	56,5:	33,5:	21,9:	636 :
1950-51:	18,4:	12,6:	10,2:	13,0:	28,3:	74,4:	218,4:	125,2:	130,4:	75,6:	30,7:	25,4:	763 :
1951-52:	21,6:	19,1:	11,6:	16,2:	37,0:	56,8:	134,3:	118,9:	104,5:	66,9:	34,9:	24,9:	647 :
1952-53:	20,1:	18,6:	15,7:	16,1:	32,2:	77,2:	107,6:	105,8:	152,8:	74,2:	35,0:	26,1:	681 :
1953-54:	23,0:	19,2:	15,2:	13,4:	22,7:	98,2:	161,2:	130,8:	97,6:	52,0:	31,2:	20,4:	685 :
1954-55:	16,8:	16,6:	11,4:	12,7:	22,7:	66,4:	112,6:	106,5:	148,8:	62,0:	33,7:	22,8:	633 :
1955-56:	20,7:	18,9:	12,8:	17,5:	19,0:	86,7:	135,6:	130,4:	52,7:	63,8:	32,8:	24,2:	615 :
1956-57:	17,5:	19,6:	10,3:	12,3:	38,0:	102,1:	76,8:	131,4:	185,1:	90,9:	47,6:	33,3:	765 :

TABLEAU XIII

BETSIBOKA à AMBODIROKA

Lames d'eau mensuelles classées

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
	35,4	28,4	20,6	26,4	58,2	134,2	258,5	209,0	185,1	132,5	51,2	44,8
	33,9	26,9	20,1	26,2	38,0	115,0	218,4	170,3	162,8	131,4	50,7	44,3
	28,4	26,4	19,2	25,6	37,0	102,1	172,7	157,3	153,6	102,1	50,3	35,6
	27,0	23,8	16,4	25,2	34,6	98,2	168,0	148,0	152,8	94,1	49,1	35,1
	26,8	22,7	15,7	22,4	33,0	95,3	161,2	143,5	148,8	91,6	48,8	34,0
	26,4	22,4	15,4	20,9	32,6	86,7	151,4	142,9	141,0	90,9	47,6	33,3
	25,9	21,5	15,4	20,6	32,2	83,8	148,6	141,7	140,7	84,1	46,6	32,5
	25,0	21,2	15,3	20,1	30,3	77,2	146,3	137,5	130,4	84,0	44,2	32,3
	24,5	21,0	15,2	17,9	28,3	75,2	135,6	137,2	124,0	80,2	43,2	29,3
	23,0	20,7	15,2	17,5	25,3	74,4	134,3	135,1	121,0	75,6	41,2	28,0
	22,9	19,7	14,9	17,0	22,7	70,0	130,6	131,4	114,6	74,2	40,7	27,7
	22,6	19,6	14,5	16,2	22,7	66,4	129,9	130,8	110,7	70,4	37,4	26,9
	21,6	19,4	14,1	16,1	22,5	65,7	125,3	130,4	110,3	67,9	35,0	26,1
	20,7	19,2	13,8	16,1	21,5	65,2	119,0	125,3	105,3	66,9	35,0	25,4
	20,1	19,1	12,8	13,9	19,2	62,6	112,6	125,2	104,5	66,5	34,9	25,1
	20,0	18,9	12,1	13,4	19,0	60,7	107,6	125,1	97,6	63,8	33,7	24,9
	19,2	18,6	11,6	13,0	18,8	56,8	91,9	118,9	80,2	63,3	33,5	24,2
	18,4	16,8	11,4	13,0	18,2	55,8	78,9	116,2	79,3	62,0	32,8	22,8
	17,5	16,6	10,3	12,7	17,7	55,1	76,8	106,5	72,4	56,5	31,2	21,9
	16,8	12,6	10,2	12,3	6,5	54,2	38,8	105,8	52,7	52,0	30,7	20,4
Moyennes	23,8	20,8	14,7	18,3	26,9	77,7	135,3	136,9	119,4	80,5	40,9	29,7
Médianes	23,0	20,2	15,1	17,3	24,0	72,2	132,5	133,3	117,8	74,9	41,0	27,9

TABLEAU XIV

N°	H classées	F ₁	F ₂	N°	H classées	F ₁	F ₂
1	853	0,0334	0,9666	11	685	0,552	0,448
2	833	0,075	0,9215	12	682	0,605	0,395
3	777	0,132	0,868	13	681	0,658	0,342
4	777	0,184	0,816	14	655	0,712	0,288
5	765	0,236	0,764	15	651	0,764	0,236
6	763	0,288	0,712	16	647	0,816	0,184
7	742	0,342	0,658	17	636	0,868	0,132
8	735	0,395	0,605	18	633	0,9215	0,0785
9	703	0,448	0,552	19	615	0,9666	0,0334
10	692	0,500	0,500				

Si l'on admet une distribution gaussique, on trouve, pour la variable réduite :

$$x = \frac{H - 712}{67,1}$$

Le graphique 6, représentant la courbe théorique de GAUSS et les lames d'eau calculées, montre que cette hypothèse est acceptable.

3 - RESULTATS -

On trouve pour la lame d'eau décennale sèche 626 mm et 712 mm pour la lame d'eau médiane. La répartition des lames d'eau mensuelles est donnée par le tableau XIII. Les résultats sont consignés dans le tableau XV. Ces lames annuelles correspondent aux débits suivants :

- Débit annuel médian : 262 m³/s (contre 231 dans la Note de M. RIVET)
- Débit moyen de l'année décennale sèche : 230 m³/s.

Répartition statistique des lames d'eau annuelles

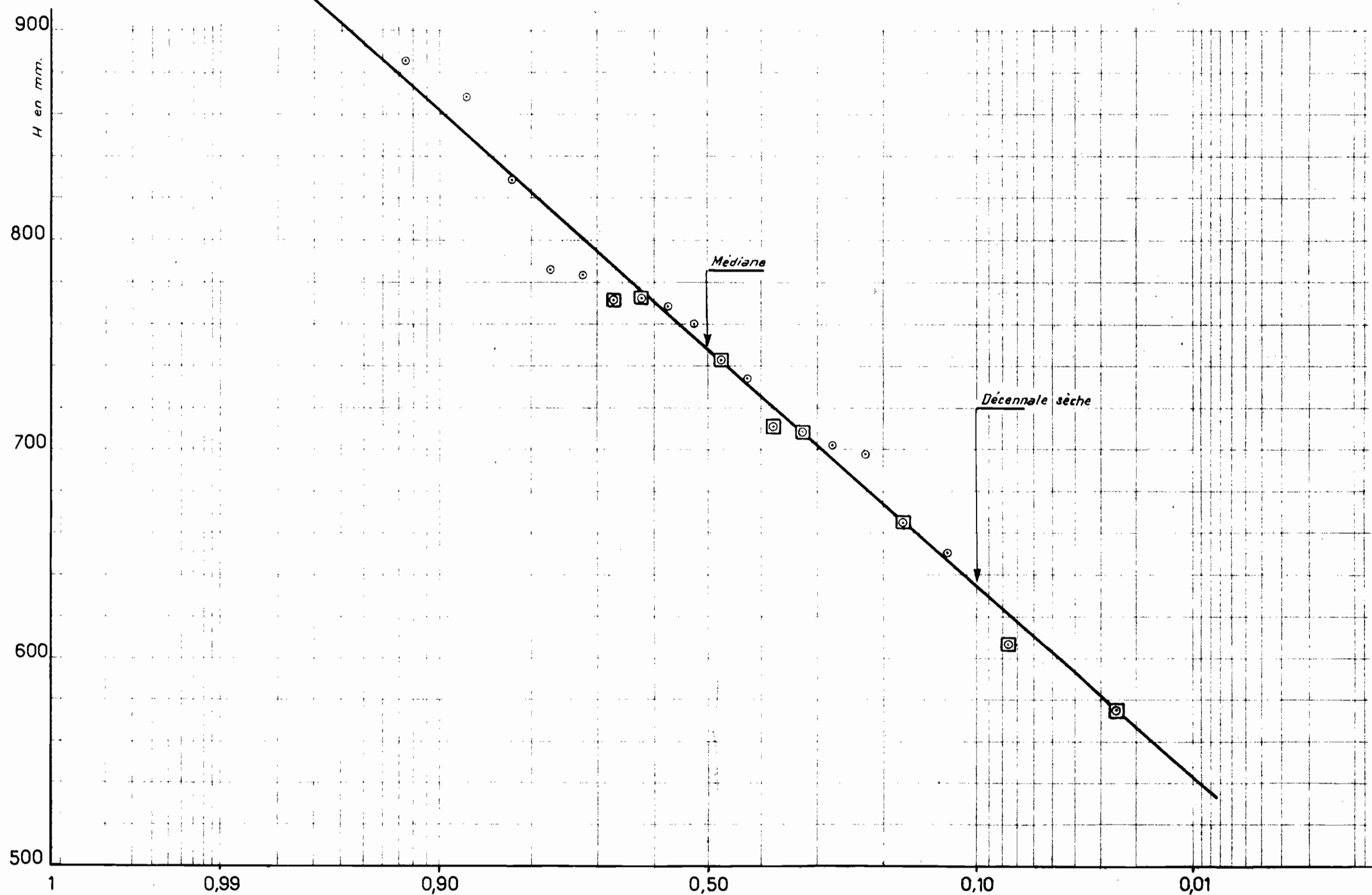


TABLEAU XV
BETSIBOKA à AMBODIROKA

(S. BV : 11.600 km²)

Année médiane

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Année
Lame d'eau mm	23,4	20,6	15,4	17,6	24,4	73,5	134,9	135,7	120,0	76,3	41,8	28,4	712
Débits moyens m ³ /sec.	101	89	69	76	109	318	584	665	520	342	181	127	262

Année décennale sèche

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Année
Lames d'eau mm	20,6	18,1	13,5	15,5	21,5	64,6	118,6	119,4	105,5	67,0	36,7	25,0	626
Débits moyens m ³ /sec.	89	78	60	67	96	280	514	585	457	300	159	112	230

Coefficient de variation : 0,094
(irrégularité interannuelle)

IV - ETUDE SOLEIL AIRE des CRUES

Le faible nombre de crues observées sur le bassin de l'IKOPA à ANTSAFRANA et le manque de jaugeages de crues, interdisent toute estimation directe de crue exceptionnelle. Ici encore il a fallu faire appel à une méthode analogique en cherchant à introduire dans le faisceau de données le plus grand nombre possible de points d'observations. Le procédé s'apparente à la méthode des stations-années couramment utilisées en pluviométrie. Nous admettons les hypothèses suivantes:

- Les plus fortes crues, sur les rivières de MADAGASCAR, sont dues principalement aux cyclones.

- Chaque cyclone a une trajectoire différente et n'intéresse pas obligatoirement au même titre tous les bassins versants retenus.

- A part la bordure côtière du versant Est qui, pour des raisons d'exposition et de morphologie, présente des crues exceptionnelles certainement très supérieures au reste de l'Ile, les chances de fortes précipitations (supérieures à une hauteur de pluie donnée) sont égales pour toutes la zone balayée par les cyclones : hypothèse très simpliste.

- Un cyclone d'intensité maxima donnée provoquerait en moyenne le même débit spécifique de crue sur les bassins de même superficie : cette hypothèse suppose, en toute rigueur, des caractéristiques de forme, de pente, de végétation, de géologie etc... identiques, ce qui est loin d'être parfaitement réalisé pour la pente et la forme. Nous avons retenu des bassins présentant le moins possible de divergences.

Ces hypothèses admises, il n'y a pas de raison "a priori" pour que les débits spécifiques les plus forts observés, compte-tenu de la superficie, ne se rapportent pas à une période de récurrence correspondant à la somme du nombre des années d'observations aux différentes stations. Nous avons groupé, dans le tableau XVI, les différents renseignements tirés des observations. . .

La RIANILA n'est portée qu'à titre indicatif : par suite de l'étalonnage douteux des hautes-eaux et de son appartenance au régime de la côte Est, nous n'en tiendrons pas compte pour l'estimation des crues de l'IKOPA. L'IKOPA à BEVOMANGA a été exclue à cause de la régularisation des crues dans la plaine de TANANARIVE : son introduction aurait augmenté artificiellement le nombre d'années de la période de récurrence avec des débits de crues beaucoup plus faibles que ceux du reste du bassin et de la BETSIBOKA.

TABLEAU XVI

MADAGASCAR

Crues maxima enregistrées à différentes

Stations

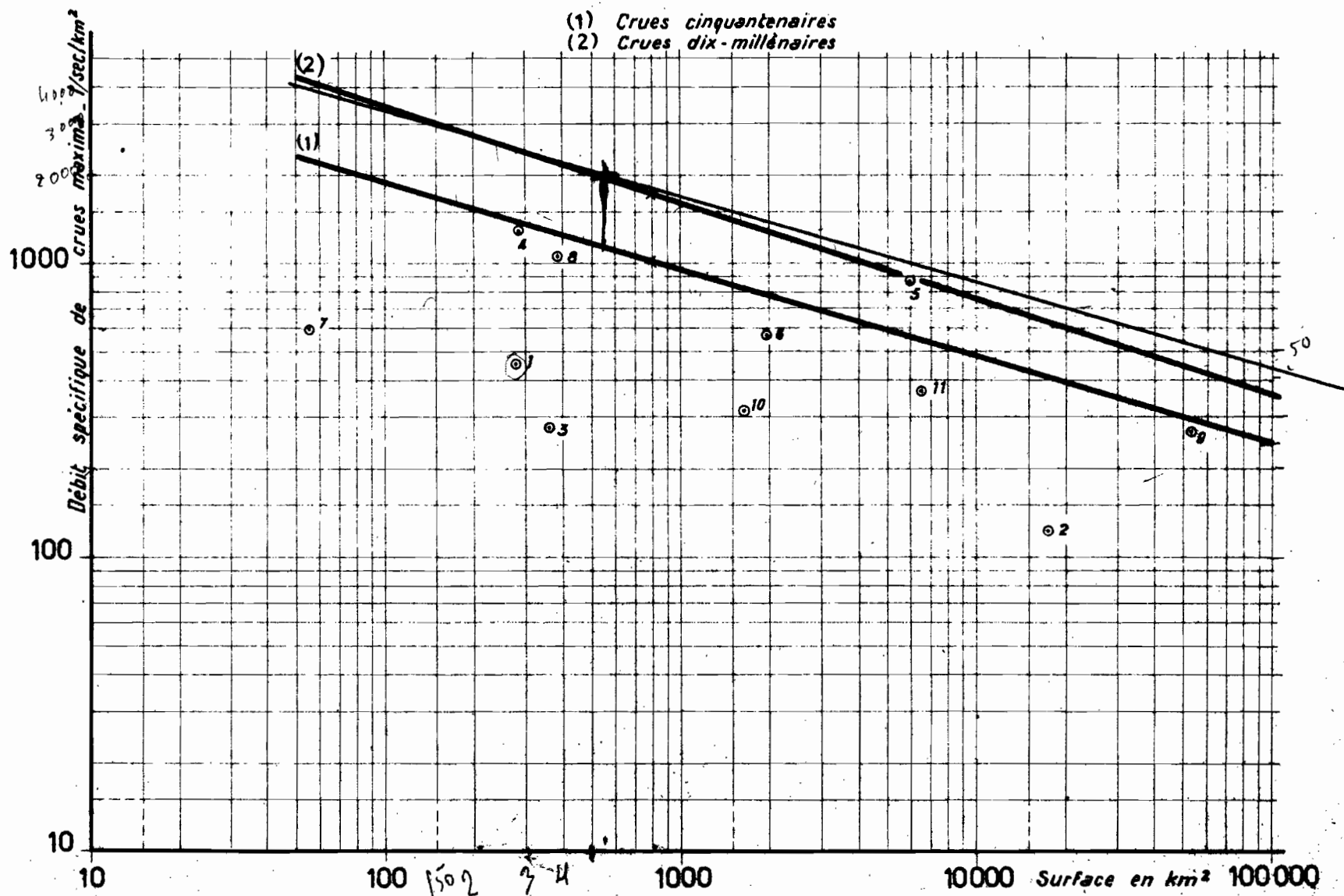
Stations	SB.V.km2	Crue maximum m3/sec.	Période en année	Débit spéc. l/s/km2
1 SAMBIRANO à AMBANJA	2.750	1.258	4	457
2 IKOPA à ANTSATRANA	18.650	2.300	8	123
3 ANDROMBA à TSINJONY	360	99	2	275
4 VARAHINA SUD à TSIAZOUMPANIRY	283	360	7	1.270
5 RIANILA à BRICKAVILLE	5.900	5.090	4	860
6 VOHITRA à ROGEZ	1.950	1.100	6	565
7 MANDRAKA au PK 68,68	57	34	6	596
8 NAMORONA à VOHIPARARA	380	400	5	1.050
9 MANGOKY au BANIAN	53.900	14.340	5	266
10 IHOSY à IHOSY	1.635	524	3	320
11 MANANANTANANA à TSITONDROINA	6.530	2.400	4	367

MAD. 7524

ED: ÉLECTRICITÉ DE FRANCE INSPECTION GÉNÉRALE UNION FRANÇAISE & ÉTRANGER
 LE: AVRIL 58 DES: GABRIAN VISA: TUBEN: A1

MADAGASCAR

Crues maxima observées sur 11 bassins



La période totale d'observations cumulées est de 50 ans (sans la RIANILA).

Sur le graphique 7, établi en coordonnées logarithmiques pour faciliter la représentation, on a porté les débits spécifiques de crues maxima observés aux différentes stations identifiées par les numéros correspondants du Tableau XVI. La courbe (1), que nous avons supposée être une droite, constitue l'enveloppe supérieure des points représentatifs à l'exclusion de celui de la RIANILA. Nous admettons qu'elle représente la courbe des crues spécifiques cinquantennaires pour les 10 bassins pris en compte et en particulier pour l'IKOPA, sauf la partie supérieure (Plaine de TANANARIVE), et la BETSIBOKA.

Nous admettons arbitrairement que la limite des crues possibles est définie par la fréquence dix-millénaire. L'application de la deuxième loi de FULLER, admise avec son coefficient standard de 0,8 donne les deux équations

$$q(10.000) = q_1 (1 + 0,8 \log 10.000)$$

$$q(50) = q_1 (1 + 0,8 \log 50)$$

$$q(10.000) = 1,78 q(50)$$

La valeur de 0,8 admise correspond à une moyenne sur les bassins tropicaux; les coefficients de FULLER que nous avons calculés jusqu'à présent sont compris entre 0,3 et 1,2. La valeur de 0,3 correspond à de grands bassins subissant déjà une forte influence équatoriale, tandis que l'on trouve 1,2 sur des bassins de régime tropical pur à très forte irrégularité interannuelle. L'IKOPA et la BETSIBOKA peuvent raisonnablement se placer entre ces extrêmes. Si d'ailleurs on adoptait 1 au lieu de 0,8 comme valeur du coefficient de FULLER, la formule deviendrait $Q(10000) = 1,85 Q(50)$: l'écart est minime compte-tenu du degré de précision que nous attachons à cette estimation.

La courbe (2) représentant les débits spécifiques de crues dix-millénaires se déduit donc de la courbe (1) en multipliant les ordonnées de celle-ci par le coefficient 1,78. Pour calculer le débit de crue instantané à évacuer sur un ouvrage en un point quelconque de l'IKOPA ou de la BETSIBOKA, il suffira donc en principe de porter la superficie du bassin correspondant sur la courbe 2 du graphique 7, de lire le débit spécifique en ordonnées et de le multiplier par la surface du bassin.

On trouve en particulier :

- 11.000 m³/sec. pour l'IKOPA à ANTSATRANA
- 8.400 m³/sec. pour la BETSIBOKA à AMBODIROKA

Nous insistons sur le caractère sommaire de cette étude, acceptable seulement pour un premier dégros-sage. De même que pour la détermination des apports mensuels et annuels, il est absolument indispensable d'attendre quelques années pendant lesquelles les études hydrologiques actuellement en cours apporteront de nouveaux éléments qui permettront de serrer de plus près le problème.

V - ESTIMATION de l'EVAPORATION à la SURFACE des RESERVOIRS

Aucune étude d'évaporation sur bac n'a été faite dans les bassins inférieur et moyen de l'IKOPA. Dans la partie supérieure, nous possédons une année complète d'observations effectuées à la station d'ANDROVAKELY (bassin de l'ANDROMEDA), dont l'altitude est d'environ 1350 m. En 1956, on a trouvé, sur bac enterré, une évaporation totale de 1570 mm.

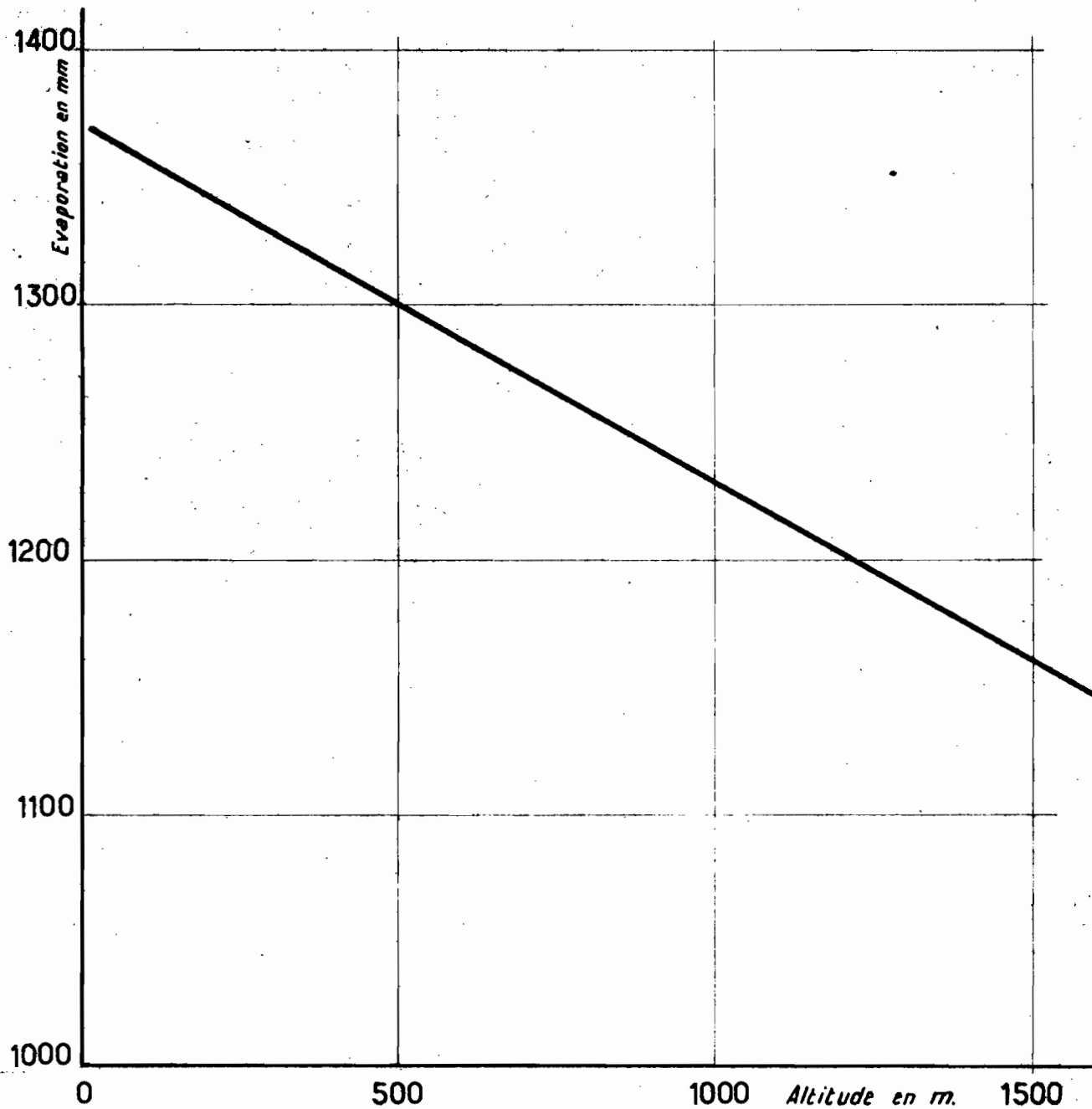
Sur le MANGOKY, à la station du BANIAN, on a trouvé 1734 mm en 1956 et 1810 mm en 1955. L'altitude de cette station est d'environ 70 m. Nous admettrons provisoirement une évaporation annuelle moyenne de 1800 mm.

En première approximation, en l'absence de données climatologiques concernant les facteurs d'évaporation en divers points du bassin de l'IKOPA et de la BETSIBOKA, nous admettrons que l'évaporation annuelle est une fonction décroissante de l'altitude. En fait, deux facteurs principaux interviennent dans l'effet du changement d'altitude sur l'évaporation : d'une part, la température qui décroît avec l'altitude, diminuant l'évaporation, d'autre part, la pression atmosphérique qui, en décroissant avec l'altitude, augmente au contraire l'évaporation. Pratiquement, l'influence de la température l'emporte nettement sur celle de la pression atmosphérique.

Nous irons encore plus loin dans la schématisation, en supposant que la relation évaporation-altitude est linéaire : ne connaissant pas la forme de cette relation, nous avons choisi la plus simple. D'autre part, nous négligeons ainsi l'influence du vent et nous supposons implicitement que l'humidité relative est fonction univoque de la température ou de l'altitude, ce qui n'est pas vérifié. Il est donc inutile de chercher une représentation compliquée sous prétexte d'une précision illusoire. D'autre part, on peut sans doute prendre, comme coefficient permettant de passer de l'évaporation sur bac à l'évaporation sur grande retenue, le nombre 0,75, ce qui donne, pour les deux points expérimentaux que nous possédons

Altitude		Evaporation annuelle
BANIAN	70 m	1360 mm
ANDROVAKELY	1350 m	1180 mm

Variation de l'évaporation totale annuelle sur une retenue
en fonction de l'altitude



MAD. 7525

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE INSPECTION GÉNÉRALE UNION FRANÇAISE & ÉTRANGER

ED:

LE: AVRIL 50

DES: BROTTARD

VISA:

TUBE N°:

A1

On obtient ainsi la courbe du graphique 8 représentant l'évaporation annuelle totale en fonction de l'altitude de la retenue. Ici encore, il sera nécessaire de compléter ces renseignements par des observations sur bacs à différentes altitudes à l'intérieur même du bassin.